

К.Я. Кондратьев

## Аэрозоль и климат: современное состояние и перспективы разработок. 2. Полевой наблюдательный эксперимент ACE-Asia

*НИИ Центр экологической безопасности РАН/Международный Нансеновский фонд  
окружающей среды и дистанционного зондирования, г. Санкт-Петербург*

Поступила в редакцию 16.09.2005 г.

Обсуждены результаты комплексных исследований атмосферного аэрозоля и его трансформации в процессе дальнего переноса, выполненных в рамках программы полевого наблюдательного эксперимента ACE-Asia.

### Введение

Естественно, что (при исключительной актуальности численного моделирования) основу понимания реальных изменений климата составляет анализ данных наблюдений, в особенности региональных комплексных полевых наблюдательных экспериментов. В контексте проблематики «аэрозоль и климат» важное значение имело опубликование за последние годы тематических выпусков журнала «Оптика атмосферы и океана», посвященных разработкам в рамках программы «Аэрозоли Сибири». Особое место занимают в этой связи результаты осуществления полевой наблюдательной программы Aerodyne Characterization Experiment-Asia (ACE-Asia), посвященной исследованиям атмосферного аэрозоля и его воздействий в регионах Юго-Восточной Азии и Северо-Западного сектора Тихого океана, которые были выполнены в рамках программы ACE полевых экспериментов с целью изучения свойств аэрозоля (что касается других аналогичных программ, то они были рассмотрены в [18]). Анализ результатов ACE-Asia составляет главное содержание настоящего обзора, но прежде чем обратиться к обсуждению этой проблематики, следует кратко упомянуть о других направлениях аналогичных разработок, которые составляют контекст для ACE-Asia. Подобные разработки охватывают практически весь широкий диапазон проблематики — от процессов, связанных с образованием и эволюцией свойств отдельных частиц аэрозоля, до динамики глобального распределения аэрозоля.

На наблюдательной станции Техасского университета College Station в 2002–2003 гг. регулярно функционировал масс-спектрометр, предназначенный для измерений химического состава отдельных частиц ультрамелкого атмосферного аэрозоля различных размеров. В декабре–марте были осуществлены три серии наблюдений, разделенных интервалами времени, равными 6 нед. Всего заре-

гистрировано 128 тыс. масс-спектров для частиц с аэродинамическим диаметром от 30 до 300 нм, которые подверглись последующей классификации.

Glagolenko и Phares [9] идентифицировали и описали 15 статистически существенных классов. Наиболее часто наблюдались ионы нитрата калия, углерода и кремния/оксида кремния. Присутствие нитрата в большинстве частиц можно объяснить как результат воздействия сельскохозяйственной активности вблизи пункта наблюдений. Частота обнаружения нитрата коррелирует с приземной температурой воздуха и относительной влажностью. Другой класс частиц, идентифицируемый как амин, характеризуется наличием сильной зависимости от относительной влажности, проявляющейся, однако, лишь в условиях низкой относительной влажности. По-видимому, некоторые из зарегистрированных частиц возникали в крупных городах и покрывались пленкой из нитрата, сульфата и органических соединений в процессе дальнего переноса.

При помощи двух дифференциальных анализаторов подвижности (TDMA) 9–12 августа 2002 г. на станции наблюдений Техасского университета в College Station Santarpiа и др. [32] провели измерения подвижности заряженных частиц аэрозоля для анализа состояния гидратации аэрозоля в зависимости от размеров частиц. В процессе наблюдений аэрозоль подвергался увлажнению в воздухе с относительной влажностью  $RH = 80\%$  до и вскоре после захода Солнца ( $RH$  в атмосфере варьировала в пределах 50–70%). Исследовались частицы атмосферного аэрозоля размером от 160 до 320 нм. Рассмотрение результатов измерений показало, что гигроскопически обусловленный рост размеров частиц был ниже уровня, рассчитанного для таких неорганических соединений, как сульфат аммония. Это свидетельствует о том, что частицы представляли собой смеси растворимых и нерастворимых компонентов. Те частицы, которые характеризовались

наличием гистерезиса гигроскопического роста, почти всегда представляли собой метастабильные водные растворы.

Анализ данных наблюдений несолевого (nss) сульфатного аэрозоля в удаленном (фоновом) морском пограничном слое атмосферы (УПСА) свидетельствует о возможности наличия существенной доли фракции nss-аэрозоля в виде грубодисперсного (супермикронного) морского солевого аэрозоля. Образование nss-аэрозоля может быть лишь частично объяснено механизмами, учитывающими влияние водной фазы. Sievering и др. [39] обработали пробы атмосферного аэрозоля, собранные в Baring Head (Новая Зеландия) в условиях ясного неба и обычной облачности, которые позволили оценить вклад обусловленного приземным озоном ( $O_3$ ) механизма окисления в формирование грубодисперсной фракции частиц nss.

Согласно данным наблюдений, массовая концентрация грубодисперсного аэрозоля при ясном небе была больше 8 нмоль  $nss/m^3$ , а при средних условиях облачности — меньше 3 нмоль  $nss/m^3$ . Эти данные получены при сильном ветре (~11 м/с), минимизирующем время жизни частиц грубодисперсного аэрозоля и, следовательно, возможности его взаимодействия с облаками. Во всех случаях состав аэрозоля характеризовался избыточностью кальция (Ca), превосходящей в 200 раз (по отношению к нормальной), и соответственно щелочность аэрозоля была в 30–40 раз больше, чем у основной массы морской воды. В таких условиях происходило усиление обусловленного  $O_3$  окисления в водной фазе, которое способно объяснить наличие грубодисперсной фракции частиц несолевого аэрозоля.

Согласно данным спутникового дистанционного зондирования, Южнополушарный океан в наветренной стороне от Baring Head обладает примерно в три раза более высокой первичной продуктивностью (при соответствующем усилении концентрации биогенного Ca) по сравнению с открытым океаном. Наличие мощного источника биогенного Ca и сильного ветра определяет аномальность УПСА в регионе Baring Head. Из корабельных наблюдений в условиях более типичного УПСА в Западном секторе Тихого океана в южном полушарии следует, что усиление щелочности морского солевого аэрозоля за счет морских биогенных источников может достигать лишь от ~1 до ~2,5 раза (по сравнению с основной массой морской воды). Для грубодисперсного аэрозоля типичен интенсивный процесс его осаждения на поверхности океана, следствием которого является быстрое рециклирование поступающей из океана серы. Такого рода процесс не был, однако, учтен в предложенных ранее моделях бюджета серы в УПСА. Одним из важных последствий подобной ситуации оказался неадекватный учет вклада в образование новых частиц аэрозоля биогенной океанической серы УПСА, связанный с тем, что обусловленный озоном процесс окисления в частицах морского солевого аэрозоля оказывается более энергетически выгодным, чем одно- и двухфазная нуклеация.

Сжигание биомассы оказывает существенное региональное и глобальное воздействие на химические процессы в тропосфере. Согласно существующим оценкам вклад сжигания биомассы в формирование глобального бюджета CO составляет 15–30%, а в случаях  $O_3$  равен ~9% и  $NO_x$  ~14–18%. В глобальных масштабах сжигание биомассы служит доминирующим источником органического углеродного аэрозоля (OC) и примерно вдвое превосходит вклад выбросов за счет сжигания ископаемых топлив в бюджет OC. Роль этих двух источников примерно одинакова в случае аэрозоля из «черного углерода» (BC). Важно также, что в процессе сжигания биомассы в атмосферу поступают различные парниковые газы. Актуальной проблемой в этом контексте являются оценки роли лесных пожаров как фактора регионального загрязнения атмосферы.

De Bell и др. [6] рассмотрели случаи лесных пожаров, возникших в провинции Квебек (Канада) в начале июля 2002 г. на площади около  $10^6$  га. Образовавшийся от них дымовой шлейф был замечен на спутниковых изображениях региона Восточного побережья США. Одновременно на сети наземных станций в штате Нью-Хемпшир и на станции в Гарвардском лесу (штат Массачусетс) были зарегистрированы высокие значения концентрации окиси углерода CO. Наблюдаемый уровень отношения смеси CO оказался на 525–1025 млрд<sup>-1</sup> выше, чем в предшествующий и последующий периоды.

Наличие источника сжигания биомассы подтверждали также данные наблюдений, отображавшие возрастание содержания в составе аэрозоля таких компонентов, как  $K^+$ ,  $NH_4^+$ ,  $NO_3^-$  и  $C_2O_4^{2-}$ . Дополнительная информация о содержании K, органического и элементного углерода в составе аэрозоля свидетельствовала о том, что шлейф дыма от лесного пожара охватывал значительную часть Восточного побережья США между штатами Мэйн и Вирджиния. Сравнение с результатами наблюдений отношения смеси CO на станциях, где длина рядов достигала 10 лет и более, позволило считать, что обсуждаемое событие было крупнейшим эпизодом сжигания биомассы, случившимся на Восточном побережье США за последние 10 лет. Из данных наблюдений отношения смеси CO, а также коэффициентов рассеяния, рассчитанных по данным о счетной концентрации частиц аэрозоля диаметром меньше 2,5 мкм (PM-2,5), следует, что масштабы рассматриваемого события сравнимы с воздействиями крупных событий антропогенных загрязнений и формирования дымки, время от времени проявляющимися в сельских регионах Новой Англии. Степень возрастания содержания в шлейфе от лесных пожаров таких компонентов, как  $O_3$ ,  $NO_y$ ,  $NO_3^-$ ,  $NH_4^+$  и  $SO_4^{2-}$ , характеризовалась наличием значительной зависимости от высоты и от широты, что было связано, вероятно, с изменчивостью дальнего переноса и процессов осаждения на подстилающую поверхность.

Eldering и др. [8] выполнили восстановление вертикальных профилей объемной концентрации

частиц сульфатного аэрозоля и коэффициента экстинкции по данным за 1992, 1993 и 1994 гг. установленного на ТКК Space «Shuttle» инфракрасного спектрометра высокого спектрального разрешения ATMOS. Поскольку наблюдения происходили в период после происшедшего в июне 1991 г. мощного извержения вулкана Пинатубо, анализ полученных результатов позволил проследить эволюцию вулканического сульфатного аэрозоля на протяжении трех лет после извержения. В работе [8] приведены результаты восстановления вертикальных профилей объемной концентрации аэрозоля для трех регионов земного шара в диапазоне высот от 10 км (в полярных широтах) до 20 км (в субтропических широтах) и выше. Объемная концентрация аэрозоля достигала  $2\text{--}3,5 \text{ мкм}^3/\text{см}^3 \pm 10\%$  в 1992 г. и уменьшилась до  $0,2\text{--}0,5 \text{ мкм}^3/\text{см}^3 \pm 20\%$  в 1994 г., что согласуется с другими аналогичными данными наблюдений. Хорошее согласие результатов восстановления получено и в случае вертикальных профилей коэффициента экстинкции.

Ramachandran [30] обсудил результаты судовых наблюдений изменчивости и трендов аэрозольной оптической толщины (АОТ) в интервале длин волн 400–850 нм, выполненных во время рейсов 1996–2000 гг. в периоды северо-восточного зимнего муссона в регионах Аравийского моря (АМ) и тропиков Индийского океана (ТИО). Было обнаружено наличие очень сильного широтного градиента АОТ по мере движения судна от побережья Индии (ПИ) в глубь океана. Наблюдаются тренды возрастания АОТ вблизи ПИ и АМ, но уменьшения АОТ в зоне ТИО в течение всего 5-летнего периода наблюдений. Среднемесячные значения АОТ декабрь–апрель возрастают в регионах ПИ и АМ, но уменьшаются в зоне ТИО. Проанализированы и сопоставлены тренды АОТ в двух пунктах наблюдений на суше [Trivandrum (TVM) и Vishapakatnam (VSK)] на Индийском п-ове и в двух точках в регионе океана, находящихся на направлении преобладающих ветров со стороны Индийского субконтинента. Для средних за 5 лет значений АОТ во всех случаях наблюдается менее сильный широтный градиент, а значения АОТ близки по величине. За четырехлетний период в TVM зарегистрирован тренд возрастания АОТ, но в VSK заметного тренда не обнаружено. В двух упомянутых точках региона Индийского океана имеет место такой же тренд убывания АОТ, который типичен и для всего океана. В декабре – апреле как на суше, так и над океаном наблюдается возрастание средних месячных значений АОТ.

По данным судовых наблюдений спектральной аэрозольной оптической толщины над Аравийским морем и тропиками Индийского океана в периоды северо-восточного зимнего муссона в 1996–2000 гг. Ramachandran [31] рассчитал параметры Ангстрема  $\alpha$  и  $\beta$  с целью анализа их пространственно-временной изменчивости (оптическая толщина  $\tau = \beta \lambda^{-\alpha}$ , где  $\lambda$  — длина волны). Для осредненного за 5 лет значения экспоненты Ангстрема  $\alpha$  получены значения, составляющие около 1,5 для регионов прибрежной

Индии, АМ и ТИО, 5-летнее среднее значение параметра мутности  $\beta$  равно примерно 0,14 над ПИ; 0,10 над АМ и 0,05 над ТИО. Изменчивость  $\alpha$  и  $\beta$  характеризуется наличием межгодовых вариаций и изменениями значений этих параметров от месяца к месяцу. Средние за 5 лет значения  $\alpha$  и  $\beta$  в двух пунктах наблюдений на суше (TVM и VSK) и в двух морских точках наблюдений [Minicoy (MCY) и Kaashidoo (KCO)] составляют около 1 и 0,2 соответственно. Отчетливо проявляется зависимость АОТ на длине волны 500 нм за период 1996–2000 гг. от среднесуточной скорости ветра. Оценка расстояния, на котором сказывается влияние континентального аэрозоля на оптические свойства атмосферы над Индийским океаном, дала значение, равное 1500 км. Получены также оценки осредненного за 5 лет антропогенного вклада в формирование АОТ на длине волны 500 нм, который оказался более 90% над ПИ и АМ, но был более слабым (74%) над ТИО. В случаях MCY и KCO этот вклад меньше 70%.

Поскольку пылевой аэрозоль, возникающий главным образом под воздействием пылевых бурь в пустынях, является одним из главных компонентов глобального аэрозоля, Martonchik и др. [21a] предприняли сравнение результатов восстановления аэрозольной оптической толщины по данным дистанционного зондирования при помощи спутникового многоуглового видеоспектрорадиометра MISR с данными четырех станций AERONET наблюдений при помощи солнечных фотометров, расположенных в пустынях, за период с декабря 2000 г. по ноябрь 2002 г. Сравнение двух серий данных выявило хорошее согласие (при отсутствии систематических расхождений), что свидетельствует об адекватности данных MISR об АОТ в видимой и близкой ИК-областях спектра над подстилающей поверхностью с высоким альбедо. Случайные погрешности восстановления АОТ по данным MISR составляют 0,08, при пространственном разрешении данных, равном 17,6 км. При снижении последнего до 52,8 км погрешность уменьшается до 0,05. Таким образом, данные MISR по АОТ вполне могут быть использованы для достоверных количественных оценок изменчивости запыления атмосферы в регионах пустынь.

Schaap и др. [36] предложили модель мелкодисперсной фракции атмосферного аэрозоля для Западной Европы применительно к условиям 1995 г. с учетом ВС, опирающуюся на результаты новой инвентаризации антропогенного первичного аэрозольного вещества. Оценки годовых выбросов ВС в Западной Европе и в России за 1995 г. привели к значениям, равным соответственно 0,47 и 0,26 Тг при максимальных вкладах выбросов в формирование аэрозоля за счет транспорта и домашнего хозяйства. Согласно предложенной модели концентрация ВС изменяется от  $\leq 0,05 \text{ мкг}/\text{м}^3$  в удаленных фоновых регионах до  $> 1 \text{ мкг}/\text{м}^3$  в густо населенных регионах. Модельные значения концентрации составляют около 25% по отношению к суммарной концентрации первичного аэрозоля.